

Part 4 台風予測の現状

まず、ボールを落とすことを例に 「予測する」ということを考える

- ボールを静かに手から落とす
- ボールは下に落ちる
- 重力だけがかけるとすると、
速度は t 秒後に $v=9.8t$ (m/s)
落ちる距離は $x=4.9t^2$ (m)
と計算できる。
- すごいところは、物理に基づき
「ボールを落とす前から」
落下速度や距離が分かること。



石ころの落下を正確に 予測するために必要なもの

- 初期の状態

⇒ 静止状態か運動中か。

- 考慮する物理法則（物理モデル）

⇒ 重力だけを考えるなら、先ほどの式で落下速度と距離が計算できる。空気抵抗を考えるとより正確に計算できるはず！

正確な初期状態 + 正確な物理法則

→ 正確な予測

天気予報作成の手順

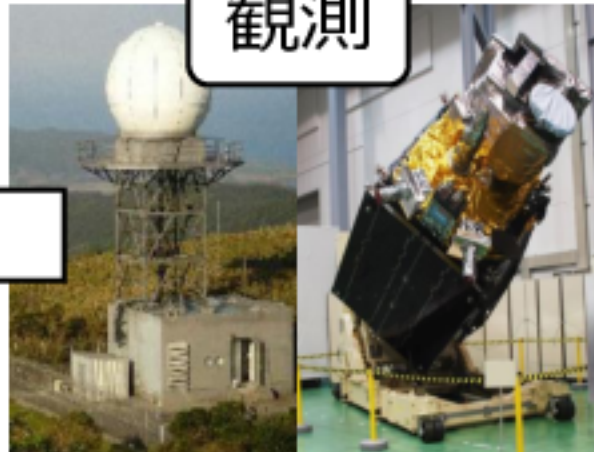
同化

observation

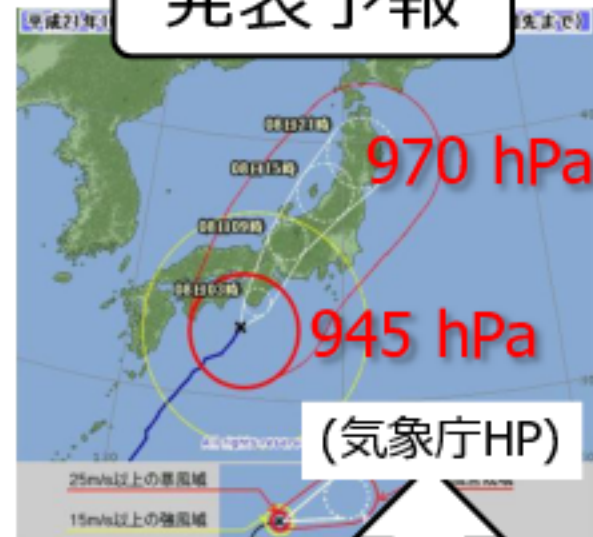
Analysis

Model

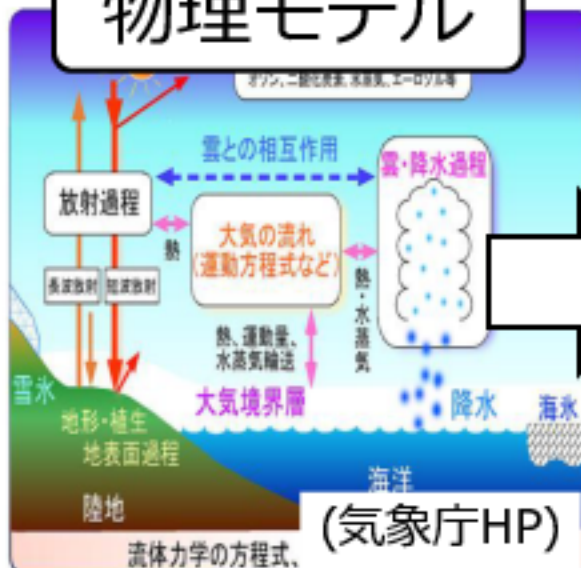
観測



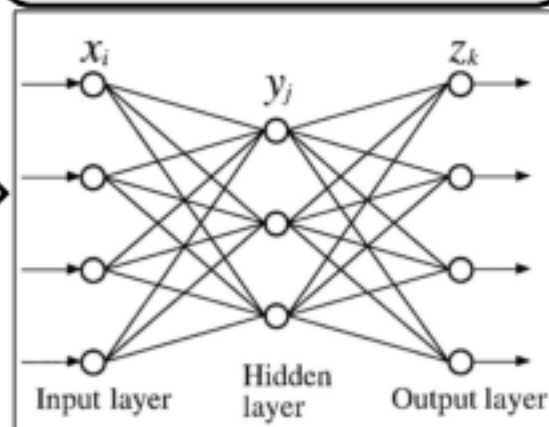
発表予報



物理モデル

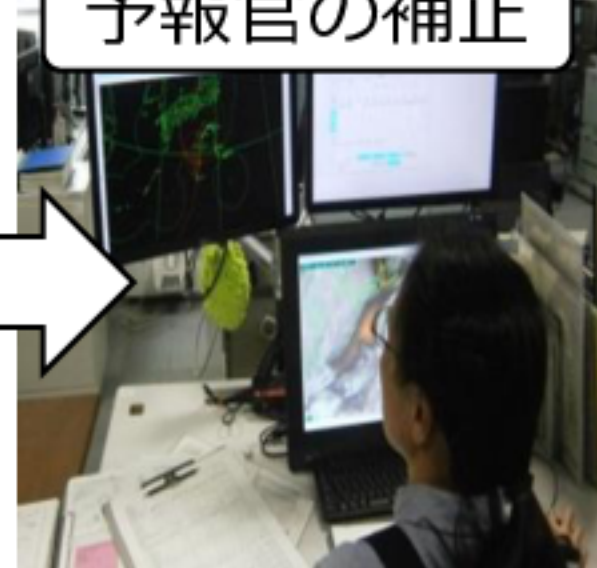


ガイダンス
(機械学習で補正)

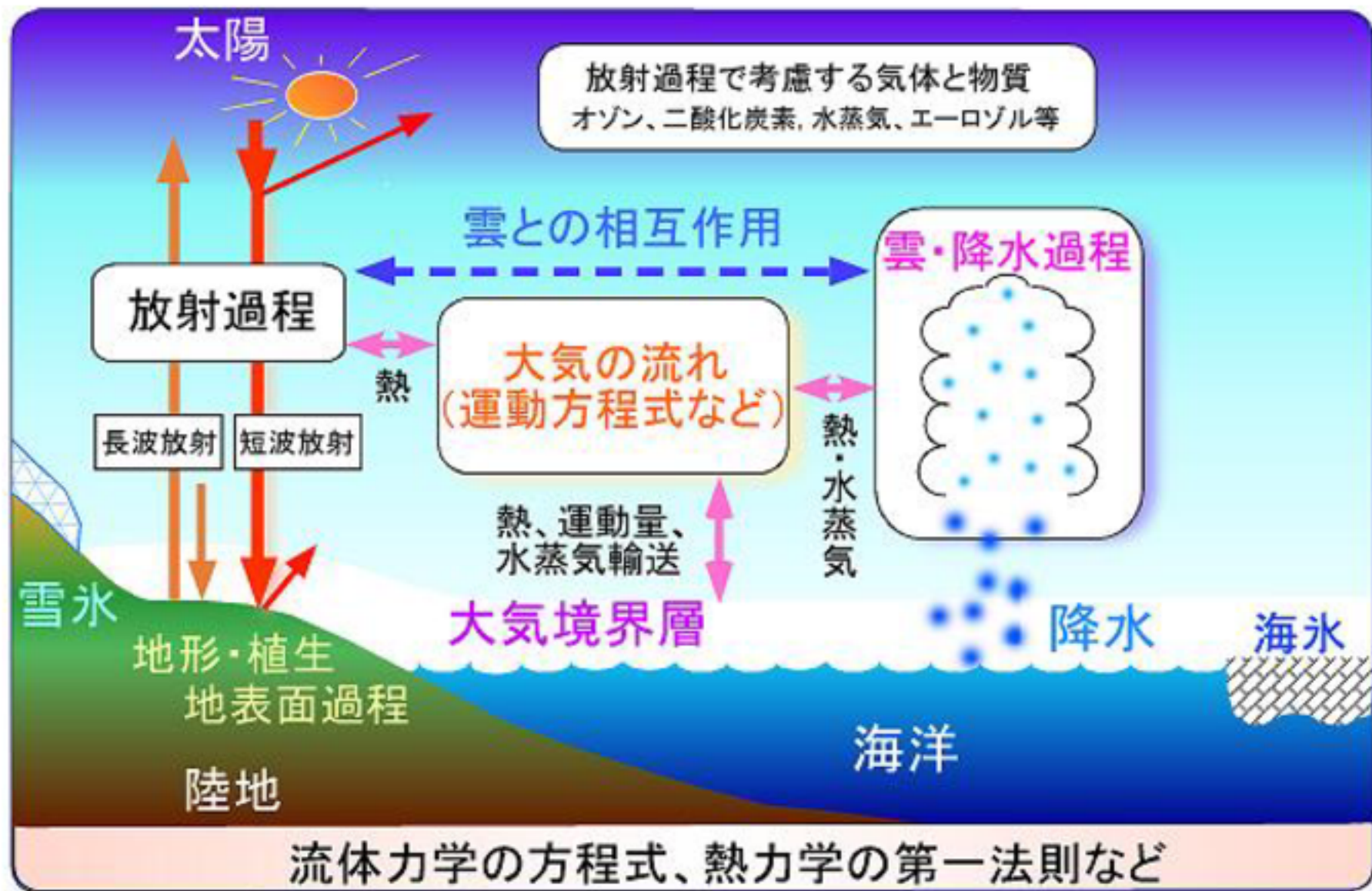


(Hsieh and Tang, 1998)

予報官の補正



モデルで考える物理法則



(気象庁HP「数値予報とは」)

観測とモデル

- 観測では現在の状態までしか分からないが、モデルを用いることで将来予測が可能となる。
- ところが、モデルを用いて予測を行うためには、正確な初期値を用意する必要がある。
→地球大気全体を20度等温としてもシミュレーションは動くが、予測には役立たない。
- 正確な初期状態(各地点の風速・気温・湿度)などを観測に基づいて推定する必要がある。

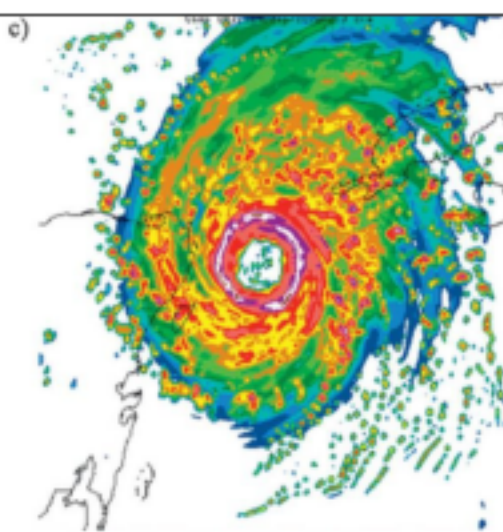
初期状態の推定は難しい

- 観測データ自身にも誤差があるので、真の値はわからない
 - 観測データは時空間的に密には存在しない
(海上や上空などでは特に難しい)
- ⇒問題を軽減するために**同化**という作業を施す

観測



シミュレーション



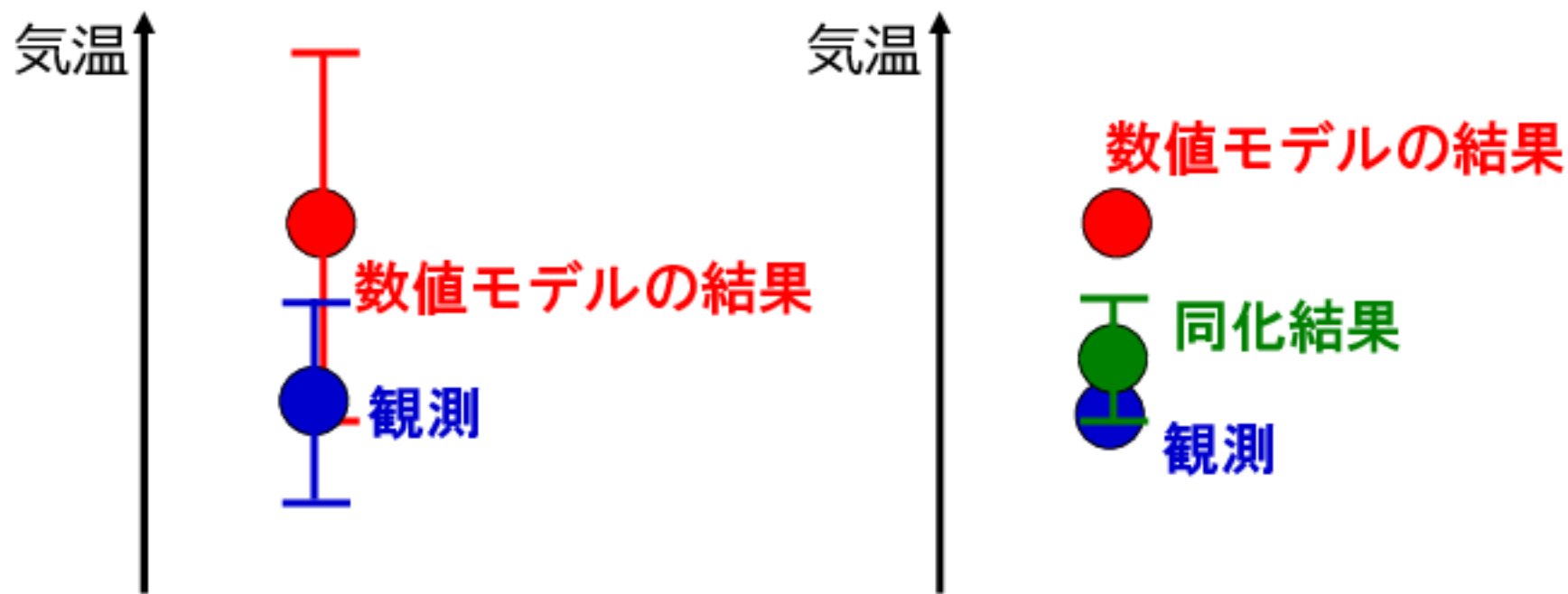
+

=

同化結果

初期状態の推定値
として予報に使う

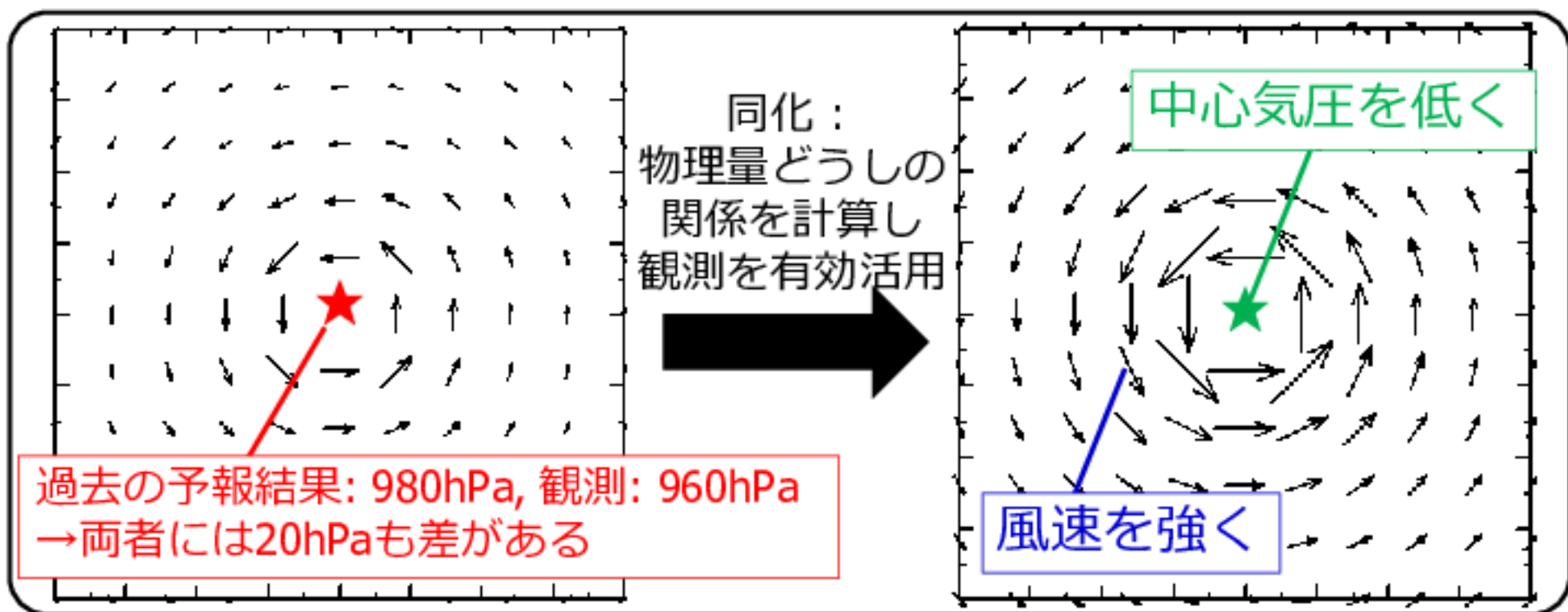
観測 + 数値モデル ⇒ 同化結果



- 観測の誤差標準偏差 σ_{Obs} とモデルの誤差標準偏差 σ_{Model} に応じて、重み付けを行う。同化結果の誤差標準偏差 σ_{Assim} は両者より小さくなる。
- 観測と数値モデルの結果を組み合わせた結果、そのいずれよりも誤差の小さい変数ができる。

同化：観測データ＋共分散のシミュレーション

- 台風を中心気圧の観測が得られたとする
⇒中心気圧の修正で終わるのはもったいない
- 例：中心気圧が低いとき風速は強い⇒風速も同時修正
- 中心気圧と風速を確率的な変数とみなし、両者の共分散も物理法則に従うとしてシミュレーション
- 同化の数学的なバックボーンは機械学習と同じ



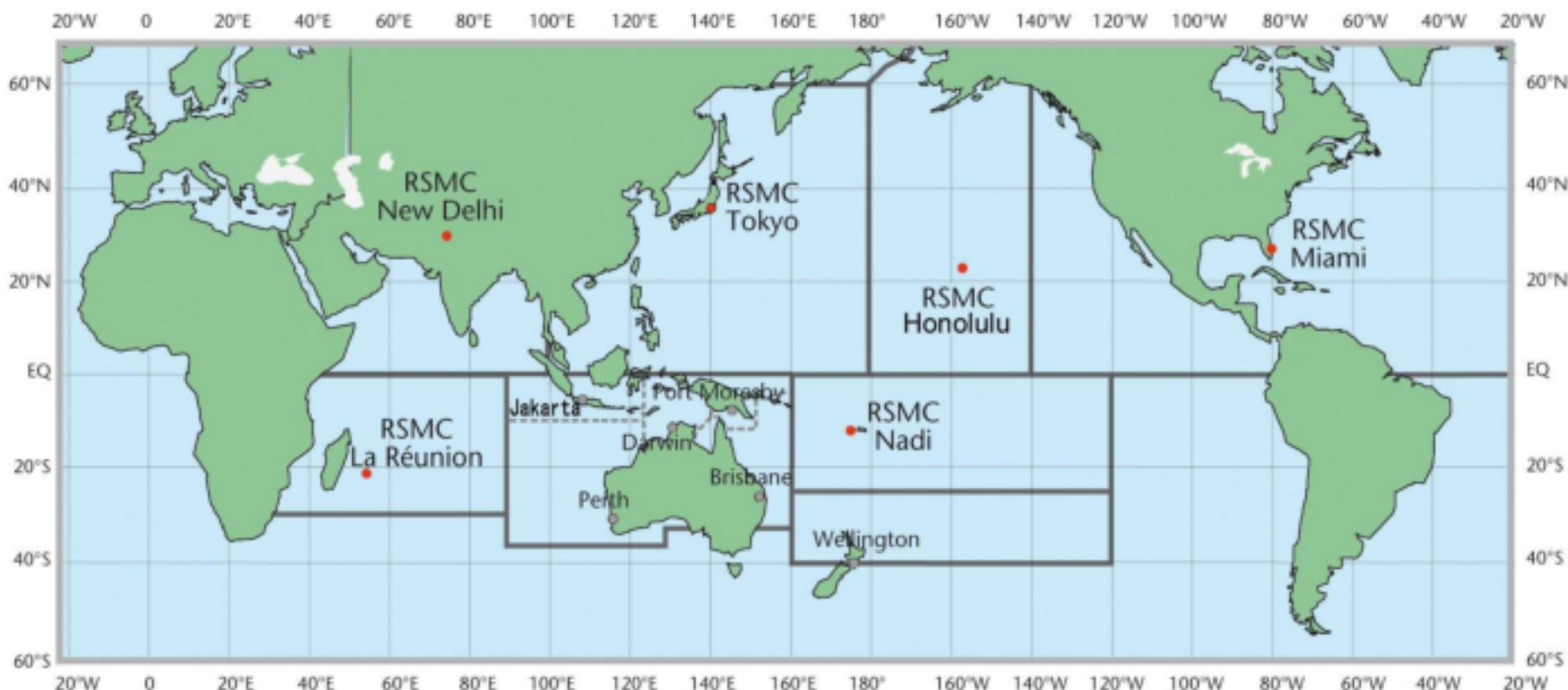
最後は統計的 + 人の手で補正

- モデルの予測は完全ではないので、ニューラルネットワークなどで、補正を施している。
- 予報官は様々な情報を踏まえて必要があれば補正を施し、最終判断をして予報を発表する。



台風予報の国際的な枠組み

- 世界気象機関(WMO)のWorld Weather Watch programという枠組みの中でいくつかの地域特別気象センター(RSMC)が関係各国に台風情報を提供している。気象庁は北西太平洋を担当。

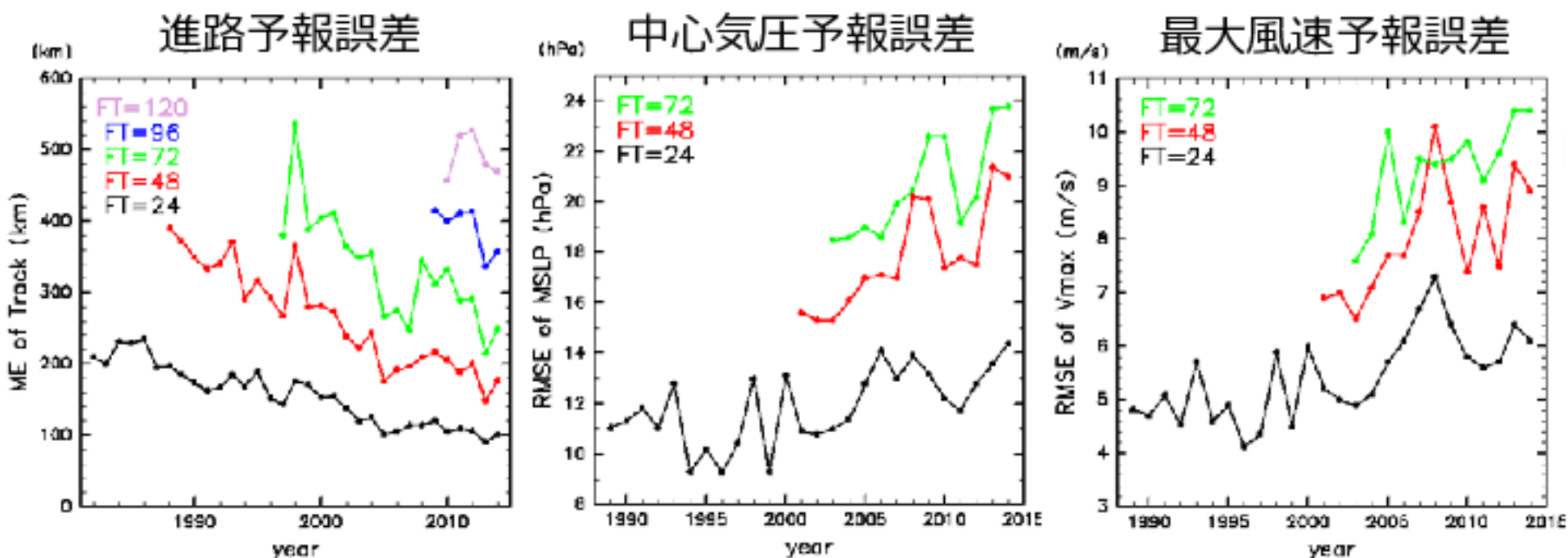


気象庁が発表する台風予報

- 進路予報：5日まで
 - 気象庁(JMA)の全球モデルGSM
 - ECMWF, UKMO, NCEPの予報も積極的に活用(2015-)
- 強度予報：3日まで
 - GSM+強度に関する統計SHIFOR (位置などの関数)
 - 統計-力学モデルSHIPS, 台風モデルCHIPSの予報も積極的に活用(2017 for a trial use)
- 発生予報：1日以内の台風発生の可能性を発表

RSMC Tokyoによる台風発表予報の誤差

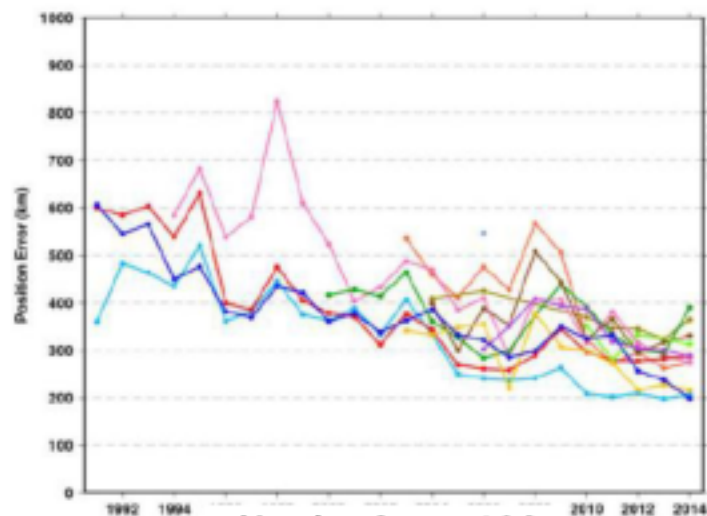
- 気象庁は各国のモデル結果などをもとに各国の機関や一般に向けた予報（発表予報）を作成する。
- 進路予報の誤差は減少し続けている。
- 中心気圧と最大風速に代表される強度予報の誤差は若干の増加傾向にある。
- この増加傾向は急発達率増加に関係しているかも？



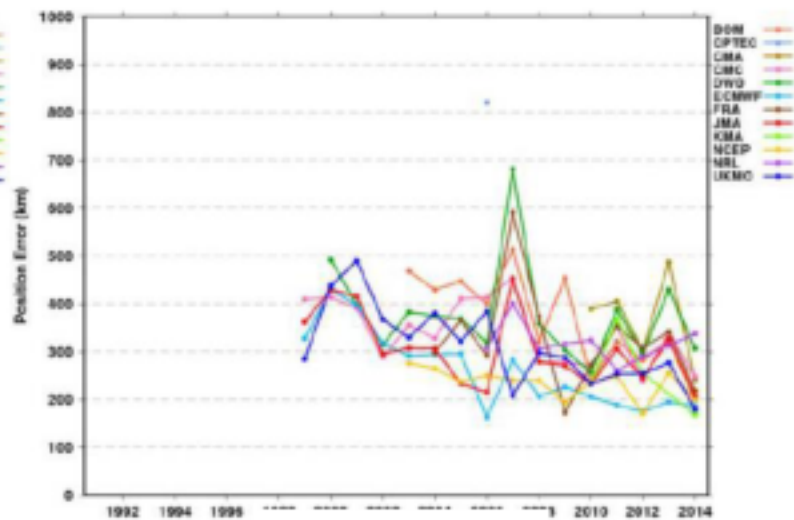
(Ito 2016, SOLA)

各国機関のモデルによる台風進路の3日予報誤差

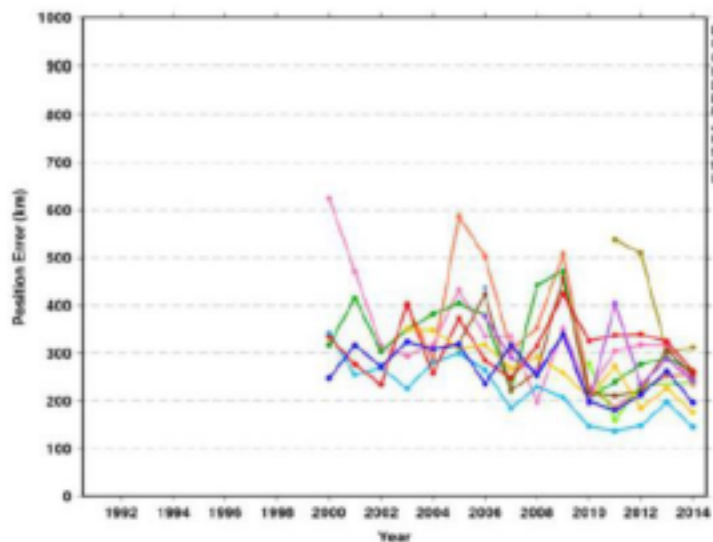
北西太平洋



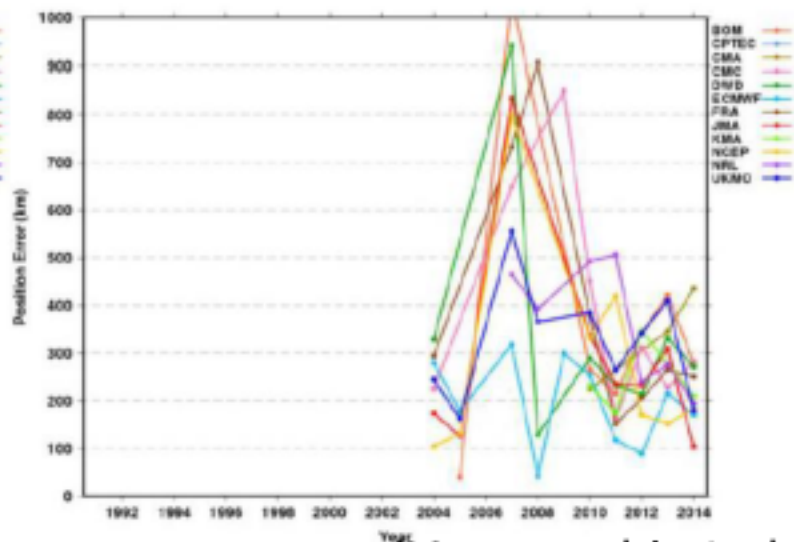
北大西洋



北東太平洋



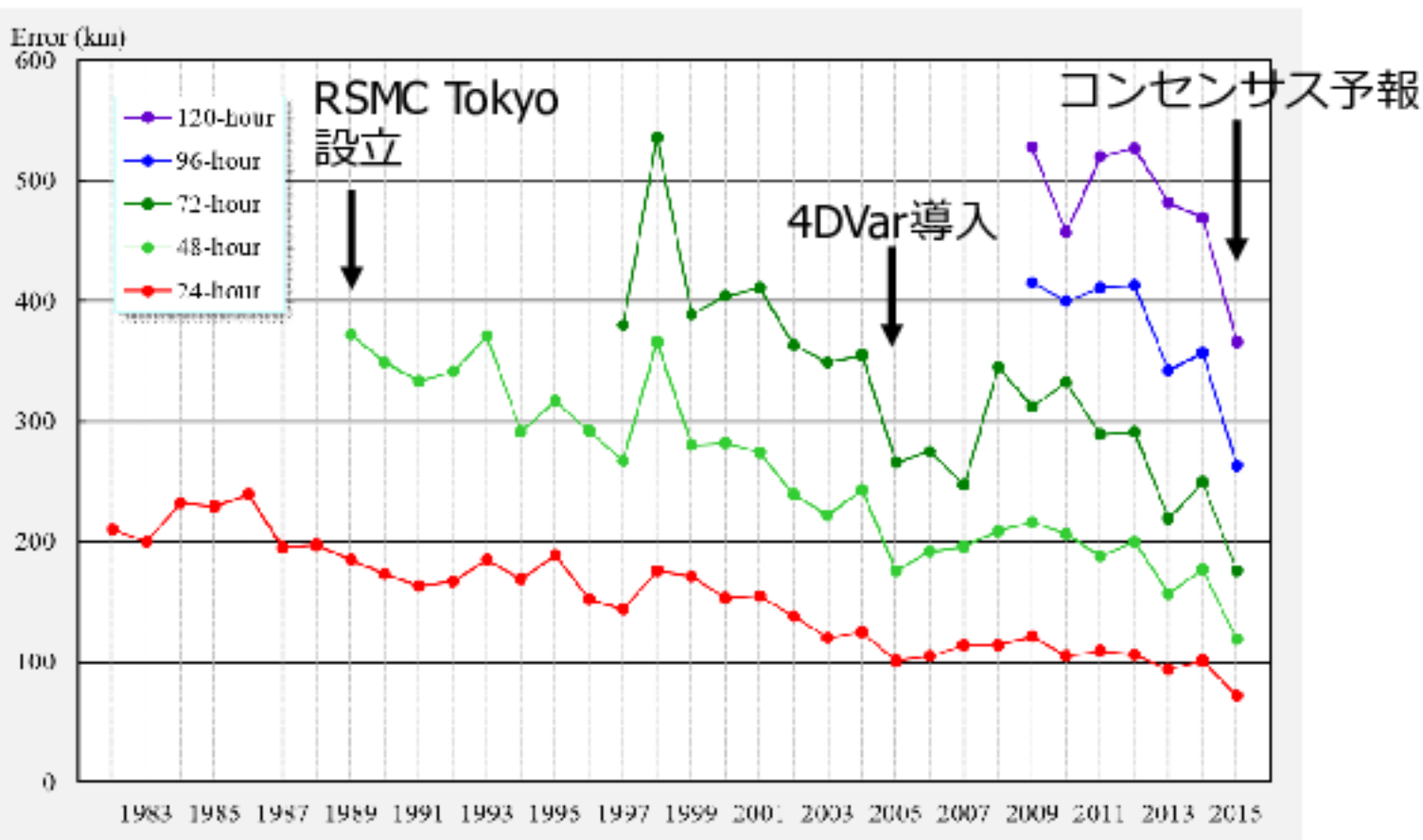
インド洋



(Yamaguchi et al., 2017)

進路予測の改善に向けて

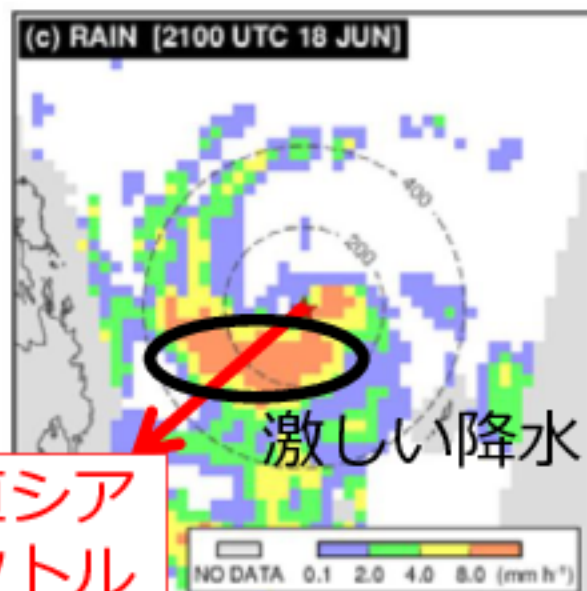
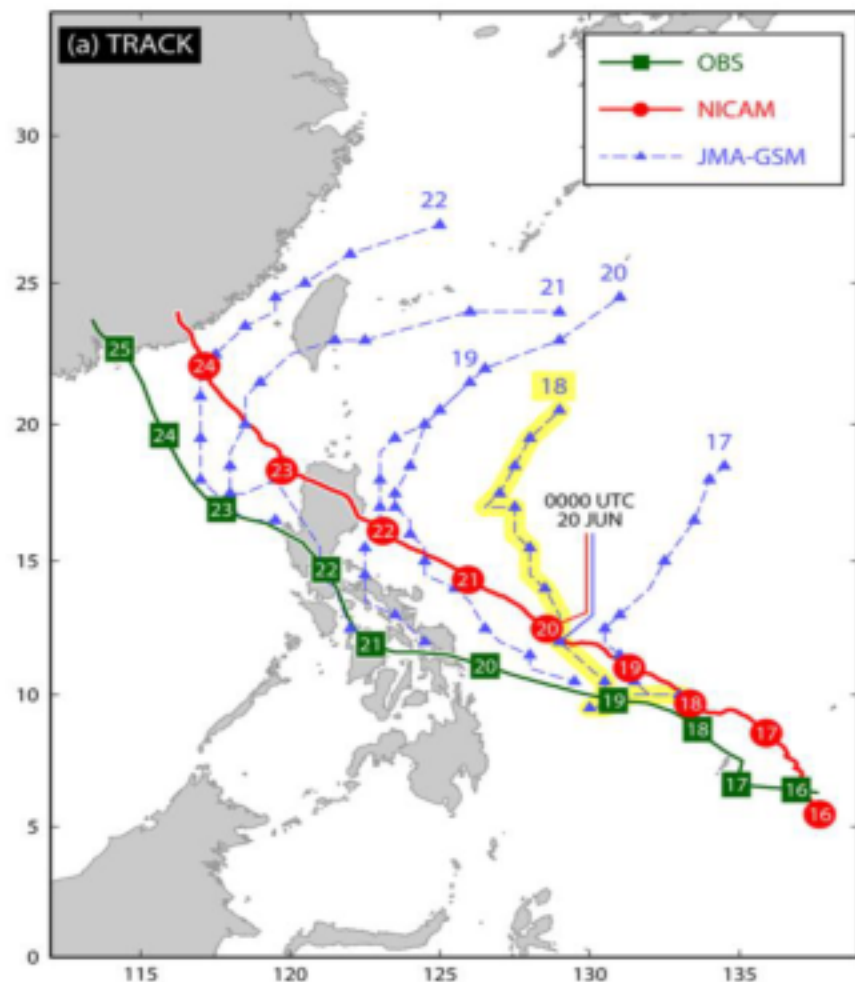
- コンセンサス予報の開始
 - 気象庁は2015年からGSMのほかに、ECMWF, UKMO, NCEPの予測も積極的に活用している。



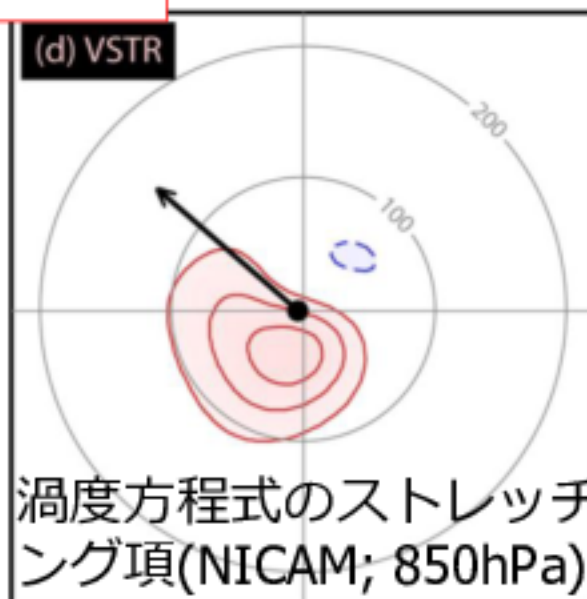
(RSMC Tokyo annual report)

非断熱加熱分布の表現→進路予報精度向上

- 非断熱加熱分布に波数 1 の非軸対称成分があるときは、その再現性が進路に効くことがある。



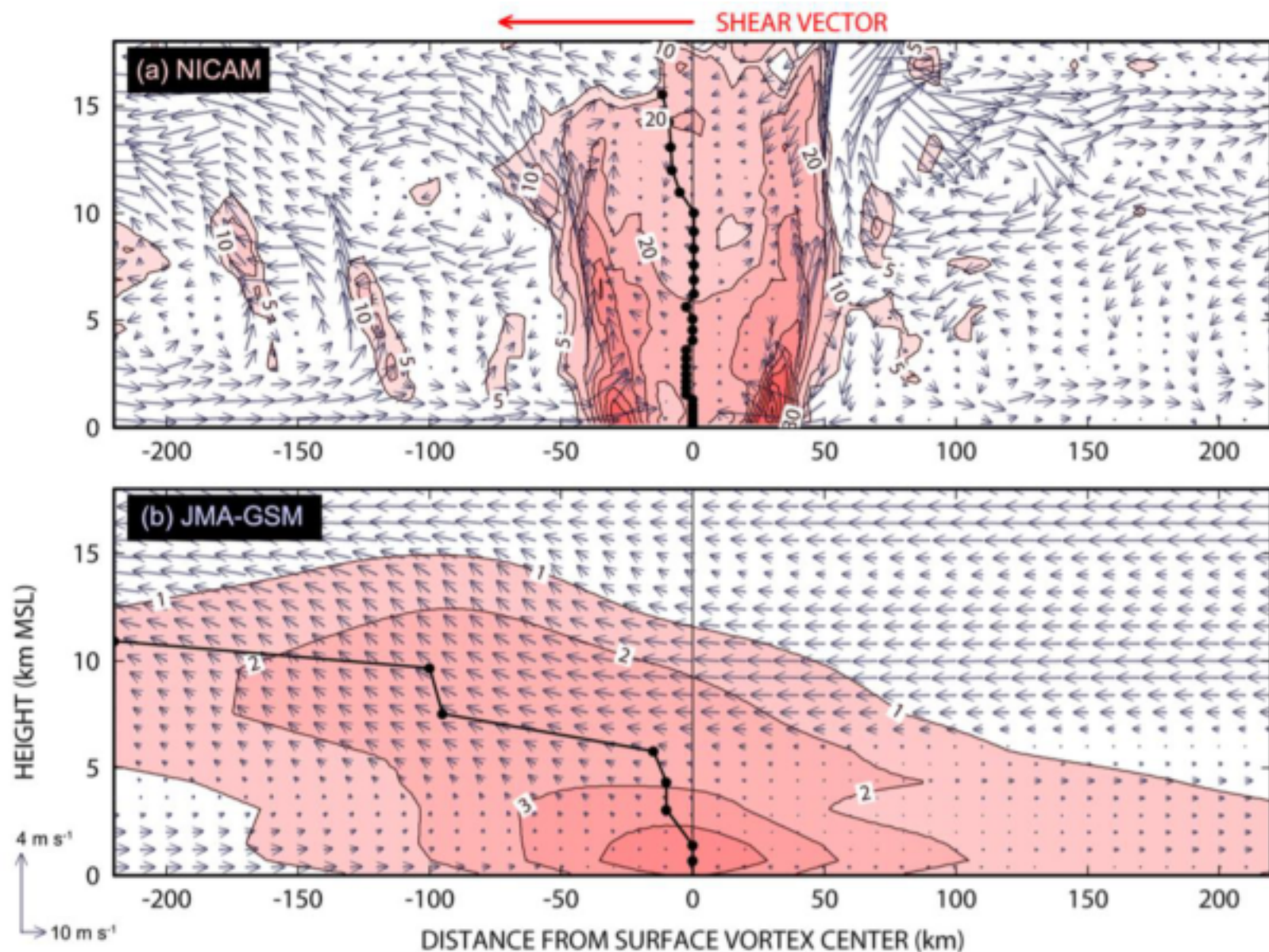
鉛直シア
ベクトル



渦度方程式のストレッチ
ング項(NICAM; 850hPa)

(Yamada et al. 2016)

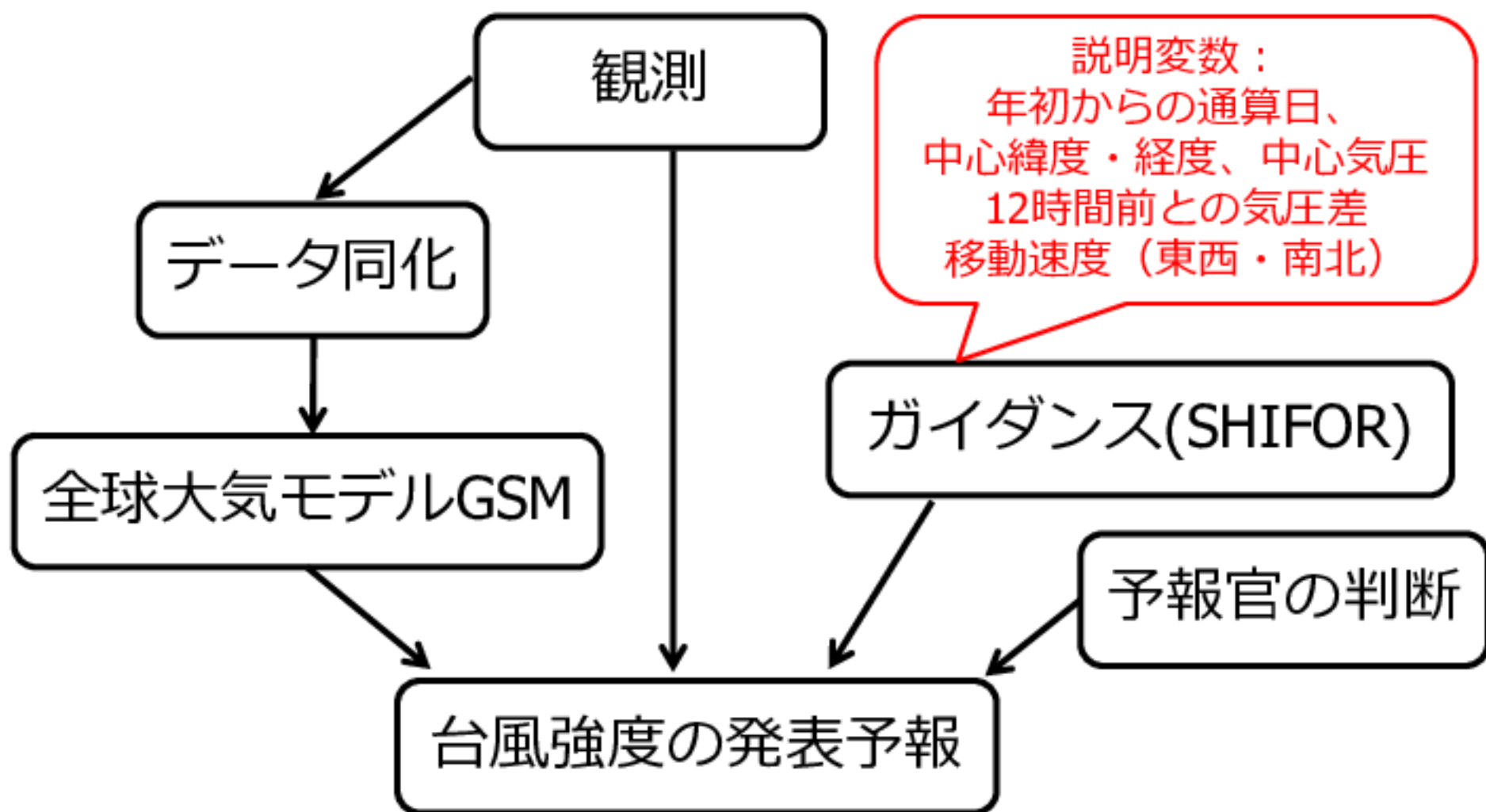
NICAMとGSMで再現された渦度場



(Yamada et al. 2016)

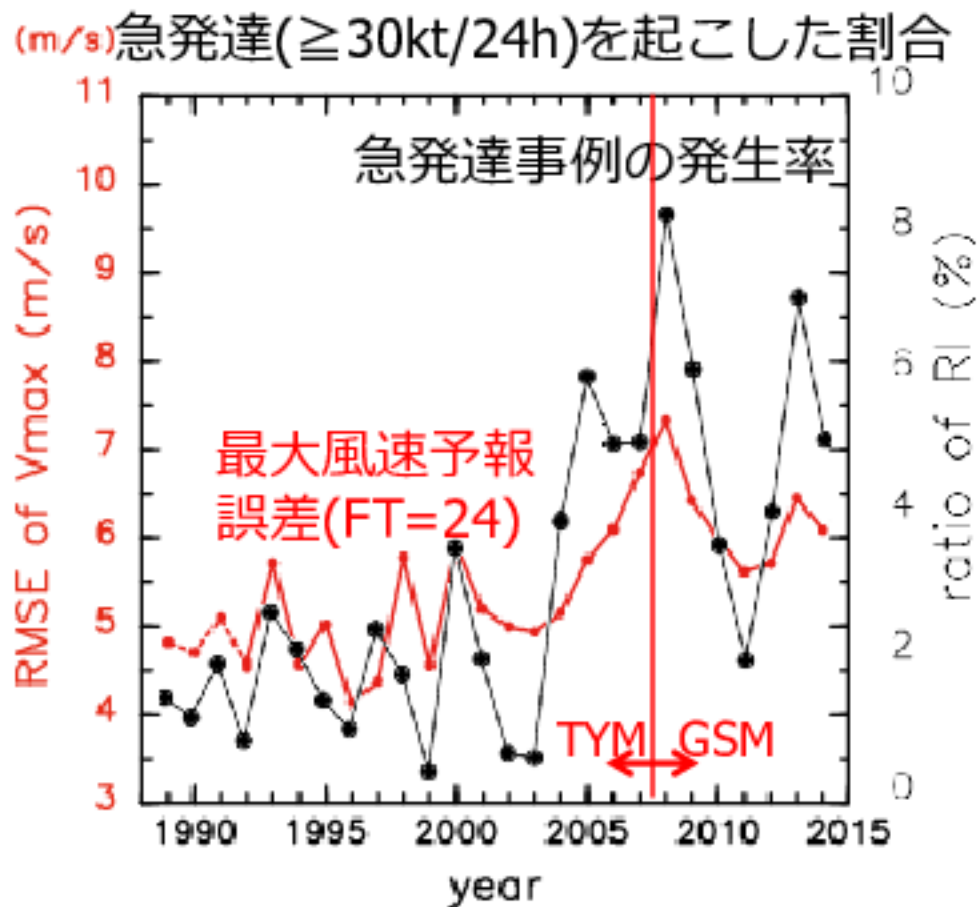
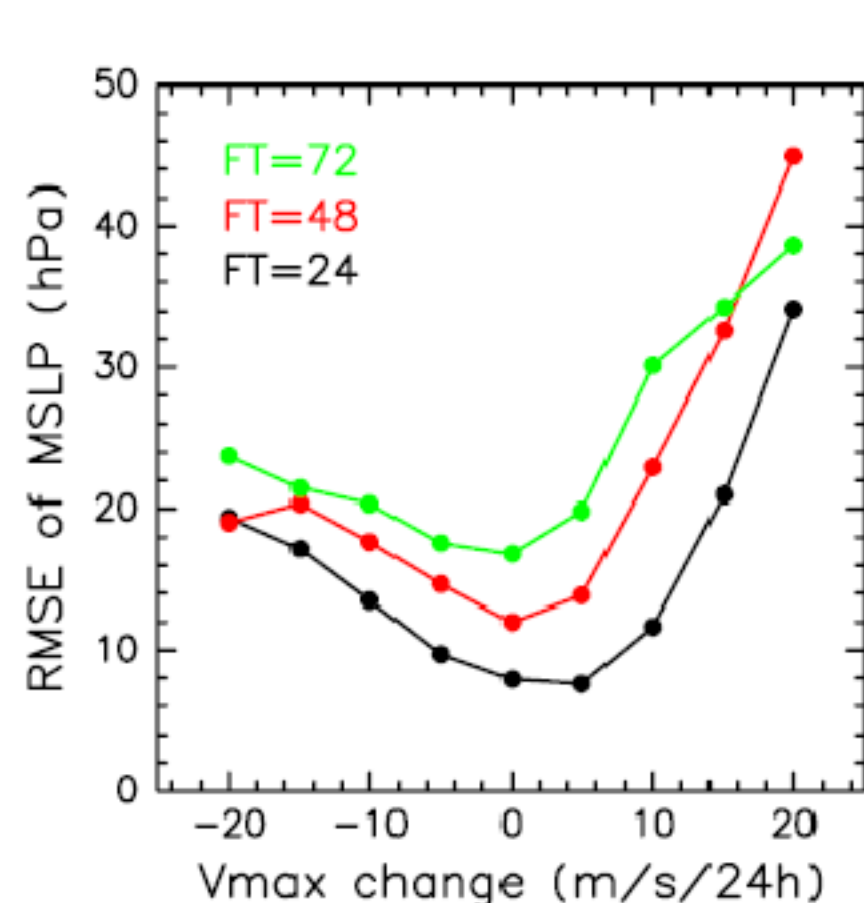
気象庁による台風強度予報(今後変わる)

- ・時間の制約もあり、気象庁では $\Delta x \sim 20\text{km}$ の全球大気モデルを台風強度予測のベースモデルとしている



強度予報誤差が増加しているのはなぜ？

- 発達率で予報誤差を分類⇒急発達時に誤差が大きい
- 2004年以降、急発達の発生率は倍になっている。



(Ito, 2016, SOLA)

台風強度予報精度を高めるために

観測

- 通常の観測 + 台風ボーガス
→ 航空機を用いた機動的観測

データ同化

- 4次元変分法(共分散の初期値: 気候値)
→ 海面交換係数の最適化、Hybrid法

シミュレーション

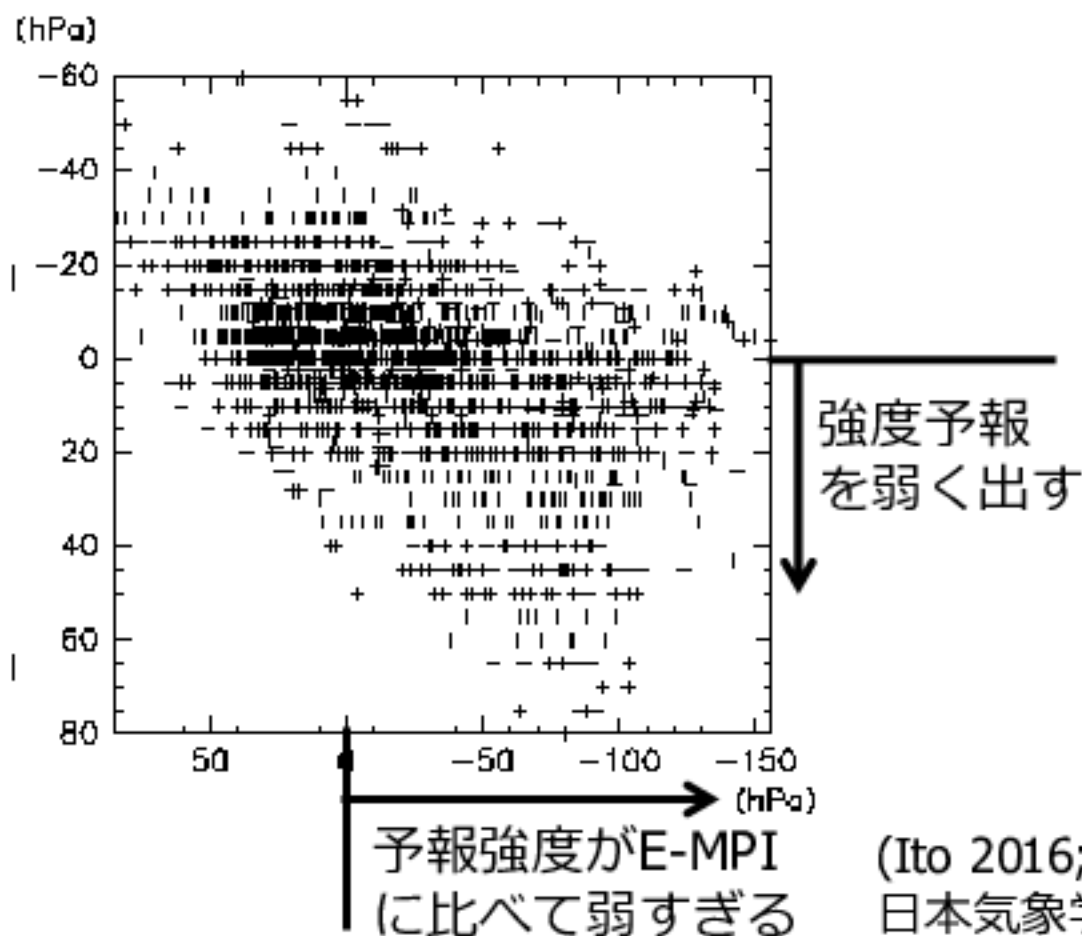
- 大気モデルGSM($\Delta x \sim 20\text{km}$)
→ 高解像度大気海洋結合モデルCMSM

補正 + 予報官の判断

- 緯度・経度などに基づいた補正
→ MPIなどを使って統計的補正

例えば：MPIを統計的な補正に使う

- 気象庁の発表予報の誤差とMPIを比較した。
- 発表予報値とMPIが大幅に異なるときは、MPIに若干近づける⇒この補正だけで強度予報誤差は5-7%減少



(Ito 2016; 伊藤ら 2015, 日本気象学会秋季大会)

参考文献

- * Aonashi, K., K. Okamoto, T. Tashima, T. Kubota, and K. Ito. (2016). Sampling error damping method for a cloud-resolving model using a dual-scale neighboring ensemble approach. *Monthly Weather Review*, **144**(12), 4751-4770.
- * Bajer, K., A. P. Bassom, and A. D. Gilbert. (2004). Vortex motion in a weak background shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **509**, 281-304.
- * Black, P. G., E. A. D'Asaro, W. M. Drennan, and J. R. French, P. P. Niler, T. B. Sanford, E. J. Terrill, E. J. Walsh, and J. A. Zhang. (2007). AIR-SEA EXCHANGE IN HURRICANES: Synthesis of Observations from the Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**, 357.
- * Bolton, D.. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, **108**, 1046-1053.
- * Bryan, G. H.. (2008). On the computation of pseudoadiabatic entropy and equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, **136**, 5239-5245.
- * Bryan, G. H., and R. Rotunno. (2009). The maximum intensity of tropical cyclones in axisymmetric numerical model simulations. *Monthly Weather Review*, **137**, 1770-1789.
- * Carr III, L. E., and R. L. Elsberry. (1990). Observational evidence for predictions of tropical cyclone propagation relative to environmental steering. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 542-546.
- * Chan, Johnny, and Jeffrey Kepert. (Eds.) (2010). *Global perspectives on tropical cyclones: from science to mitigation*. World Scientific, **Vol.**
-

4.

- * Charney, J. G., and A. Eliassen. (1964). On the growth of the hurricane depression. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **21**, 68-75.
- * Craig, G. C., and S. L. Gray. (1996). CISK or WISHE as the mechanism for tropical cyclone intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**, 3528-3540.
- * D'Asaro, E. A., P. Black, L. Centurioni, P. Harr, S. Jayne, I. -I. Lin, C. Lee, J. Morzel, R. Mrvaljevic, P. P. Niiler, L. Rainville, T. Sanford, and T. Y. Tang. (2011). Typhoon-ocean interaction in the western North Pacific: Part 1. *Oceanography*, **24**, 24-31.
- * Donelan, M. A., B. K. Haus, N. Reul, W. J. Plant, M. Stiassnie, H. C. Graber, O. B. Brown, and E. S. Saltzman. (2004). On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophysical Research Letters*, **31**.
- * Dvorak, V. F.. (1984). Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. *US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service*, **Vol. 11**.
- * Emanuel, K.. (2005). Divine wind: the history and science of hurricanes. *Oxford University Press*.
- * Emanuel, K., C. DesAutels, C. Holloway, and R. Korty. (2004). Environmental control of tropical cyclone intensity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**, 843-858.
- * Emanuel, K. A.. (1983). On assessing local conditional symmetric instability from atmospheric soundings. *Monthly Weather Review*, **111**, 2016-2033.

* Emanuel, K. A.. (1986). An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **43**, 585-604.

* Emanuel, K. A., J. David Neelin, and C. S. Bretherton. (1994). On large-scale circulations in convecting atmospheres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **120**, 1111-1143.

* Gent, P. R., and J. C. McWilliams. (1986). The instability of barotropic circular vortices. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, **35**, 209-233.

* Gentry, M. S., and G. M. Lackmann. (2010). Sensitivity of simulated tropical cyclone structure and intensity to horizontal resolution. *Monthly Weather Review*, **138**, 688-704.

* Ginis, I., and G. Sutyrin. (1995). Hurricane-generated depth-averaged currents and sea surface elevation. *Journal of physical oceanography*, **25**, 1218-1242.

* Hawkins, H. F., and D. T. Rubsam. (1968). Hurricane Hilda, 1964. *Monthly Weather Review*, **96**, 701-706.

* Holland, G. J., and R. T. Merrill. (1984). On the dynamics of tropical cyclone structural changes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **110**, 723-745.

* Houze Jr, R. A.. (2010). Clouds in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, **138**, 293-344.

* Huang, Y.-H., M. T. Montgomery, and C.-C. Wu. (2012). Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008). Part II: Axisymmetric dynamical processes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **69**, 662-674.

* Iribarne, J. V., and W. L. Godson. (Eds.) (1973). Thermodynamic Processes in the Atmosphere. in *Atmospheric Thermodynamics*. Springer, 97-132.

* Ito, K. (2016). Errors in tropical cyclone intensity forecast by RSMC Tokyo and statistical correction using environmental parameters. *SOLA*, **12**, 247-252.

* Ito, K. and C.-C. Wu. (2013). Typhoon-position-oriented sensitivity analysis. Part I: Theory and Verification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70(8)**, 2525-2546.

* Ito, K., M. Kunii, T. Kawabata, K. Saito, K. Aonashi, and L. Duc. (2016). Mesoscale hybrid data assimilation system based on JMA nonhydrostatic model. *Monthly Weather Review*, **144(9)**, 3417-3439.

* Ito, K., S. Kanda, and N. Takagaki. Horizontal transport of sea spray intensifying tropical cyclones. in revision.

* Ito, K., T. Kawabata, T. Kato, Y. Honda, Y. Ishikawa and T. Awaji. (2013). Simultaneous optimization of air-sea exchange coefficients and initial condition near a tropical cyclone with JNoVA. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **91(3)**, 337-353.

* Ito, K., T. Kuroda, K. Saito and A. Wada. (2015). Forecasting a large number of tropical cyclone intensities around Japan using a high-resolution atmosphere-ocean coupled model. *Weather and Forecasting*, **30(3)**, 793-808.

* Ito, K., Y. Ishikawa, and T. Awaji. (2010). Specifying air-sea exchange coefficients in the high-wind regime of a mature tropical cyclone by an adjoint data assimilation method. *SOLA*, **6**, 13-16.

* Ito, K., Y. Ishikawa, Y. Miyamoto and T. Awaji. (2011). Short-time-scale processes in a mature hurricane as a response to sea surface fluctuations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **68(10)**, 2250-2272.

* Ito, K., Y. Naito, and S. Yoden. (2009). Combined effects of QBO and 11-year solar cycle on the winter hemisphere in a stratosphere-troposphere coupled system. *Geophysical Research Letters*, **36**, L11804.

* Jacob, S. D., L. K. Shay, A. J. Mariano, and P. G. Black. (2000). The 3D oceanic mixed layer response to Hurricane Gilbert. *Journal of physical oceanography*, **30**, 1407-1429.

* Kano, M., S. Miyazaki, K. Ito and K. Hirahara. (2013). An adjoint data assimilation method for optimizing frictional parameters on the afterslip area. *Earth, Planets and Space*, **65(12)**, 1575-1580.

* Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, Y. Hiyoshi, K. Ito, and K. Hirahara. (2015). Real data assimilation for optimization of frictional parameters and prediction of afterslip in the 2003 Tokachi-oki earthquake inferred from slip velocity by an adjoint method. *Geophysical Journal International*, **203(1)**, 646-663.

* Kawabata, T., K. Ito, and K. Saito. (2014). Recent progress of the NHM-4DVAR towards a super-high resolution data assimilation. *SOLA*, **10**, 145-149.

* Kossin, J. P., and W. H. Schubert. (2004). Mesovortices in hurricane Isabel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**, 151-153.

* Kunii, M., K. Ito, and A. Wada. (2017). Preliminary test of a data assimilation system with a regional high-resolution atmosphere-ocean coupled model based on an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, **145(2)**, 565-581.

* Lin, I.-I., C.-C. Wu, I.-F. Pun, and D.-S. Ko. (2008). Upper-ocean thermal structure and the western North Pacific category 5 typhoons. Part I: Ocean features and the category 5 typhoons' intensification. *Monthly Weather Review*, **136**, 3288-3306.

* Lin, I.-I., C.-C. Wu, K. A. Emanuel, I.-H. Lee, C.-R. Wu, and I.-F. Pun. (2005). The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Monthly Weather Review*, **133**, 2635-2649.

* Luu, Q., K. Ito, Y. Ishikawa and T. Awaji. (2011). Tidal transport through the Tsugaru strait – part I: Characteristics of the major tidal flow and its residual current. *Ocean Science Journal*, **46(4)**, 273-288.

* Marks Jr, F. D., and R. A. Houze Jr. (1987). Inner core structure of Hurricane Alicia from airborne Doppler radar observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44**, 1296-1317.

* Mitsuta, Y., T. Suenobu, and T. Fujii. (1988). Supergradient surface wind in the eye of a typhoon. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. **Ser. II, 66**, 505-508.

* Montgomery, M. T., M. M. Bell, S. D. Aberson, and M. L. Black. (2006). Hurricane Isabel (2003): New insights into the physics of intense storms. Part I: Mean vortex structure and maximum intensity estimates. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **87**, 1335-1347.

* Moon, I.-J., I. Ginis, and T. Hara. (2004). Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under

tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**, 2334-2348.

* Nakano, S., K. Ito, K. Suzuki, and G. Ueno. (2016). Decadal-scale meridional shift of the typhoon recurvature latitude over five decades. *International Journal of Climatology*, **36**, 3819-3827.

* Ooyama, K.. (1964). A dynamical model for the study of tropical cyclone development. *Geofisica Internacional (Mexico)*, **4**, 187-198.

* Ooyama, K.. (1969). Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **26**, 3-40.

* Ooyama, K. V.. (1982). Conceptual evolution of the theory and modeling of the tropical cyclone. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. **Ser. II**, **60**, 369-380.

* Orlanski, L.. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of American Meteorological Society*, **56**, 527-530.

* Persing, J., and M. T. Montgomery. (2003). Hurricane superintensity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60**, 2349-2371.

* Powell, M. D., P. J. Vickery, and T. A. Reinhold. (2003). Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, **422**, 279-283.

* Qiu, X., Z.-M. Tan, and Q. Xiao. (2010). The roles of vortex Rossby waves in hurricane secondary eyewall formation. *Monthly Weather Review*, **138**, 2092-2109.

* Rotunno, R., and K. A. Emanuel. (1987). An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: Evolutionary study using a nonhydrostatic

axisymmetric numerical model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44**, 542-561.

* Saito, K., T. Tsuyuki, H. Seko, F. Kimura, T. Tokioka, T. Kuroda, L. Duc, K. Ito, T. Oizumi, G. Chen, J. Ito, and SPIRE Field3 Mesoscale NWP group. (2013). Superhigh-resolution meso scale weather prediction. *Journal of Physics: Conference Series*, **454**, 012073.

* Scharroo, R., W. H. Smith, and J. L. Lillibridge. (2005). Satellite altimetry and the intensification of Hurricane Katrina. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **86**, 366-366.

* Schechter, D. A., and M. T. Montgomery. (2007). Waves in a cloudy vortex. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **64**, 314-337.

* Schubert, W. H., and J. J. Hack. (1983). Transformed Eliassen balanced vortex model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **40**, 1571-1583.

* Schubert, W. H., M. T. Montgomery, R. K. Taft, T. A. Guinn, S. R. Fulton, J. P. Kossin, and J. P. Edwards. (1999). Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, 1197-1223.

* Shapiro, L. J., and H. E. Willoughby. (1982). The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **39**, 378-394.

* Smith, R. K. (1997). On the theory of CISK. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **123**, 407-418.

* Wang, Y.. (2012). Recent research progress on tropical cyclone structure and intensity. *Tropical cyclone Res. Rev.*, **1**, 254-275.

* Yablonsky, R. M., and I. Ginis. (2009). Limitation of one-dimensional ocean models for coupled hurricaneocean model forecasts. *Monthly Weather Review*, **137**, 4410-4419.

* Yamaguchi, M., M. Nakagawa, J. Ishida, and H. Sato. (2017). WGNE Intercomparison of Tropical Cyclone Forecasts by Operational NWP Models: A Quarter-Century and Beyond. *Bulletin of the American Meteorological Society*.

* Yamaguchi, M., D. S. Nolan, M. Iskandarani, S. J. Majumdar, M. S. Peng, and C. A. Reynolds. (2011). Singular vectors for tropical cyclone-like vortices in a nondivergent barotropic framework. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **68**, 2273-2291.

* Yano, J.-I., and K. Emanuel. (1991). An improved model of the equatorial troposphere and its coupling with the stratosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **48**, 377-389.

* Zhang, F., and K. Emanuel. (2016). On the role of surface fluxes and WISHE in tropical cyclone intensification. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **73**, 2011-2019.

* 伊藤耕介, 沢田雅洋, 山口宗彦. 大気モデル及び結合モデルを用いた北西太平洋全域台風予測実験, submitted.

* 坪木和久, 伊藤耕介 (分担), 中澤哲夫・筆保弘徳 (編). (2013). メソ構造. 気象研究ノート 226 号「台風研究の最前線 (上) - 台風力学-」, 93-126.

* 加納将行, 宮崎真一, 伊藤耕介, 平原和朗. (2010). 余効すべり人工データを用いたアジョイント法による摩擦パラメータ・初期値の推定. 地震第2輯, 第63巻2号, 57-69.

* 伊藤耕介. (2010). テクニカル分析の立場をベースとした複勝馬券の的中確率に関する統計モデル. 大阪商業大学アミューズメント産業研究所紀要, 第12号, 301-320.

- * Prof. Yu-Qing Wang 集中講義資料@東京大学柏キャンパス (2010)
- * 筆保弘徳, 伊藤耕介, 山口宗彦, 新田尚・中澤哲夫・斉藤和雄 (監修). (2014). 台風の正体 (気象学の新潮流 2), 朝倉書店, p.171.
- * 吉崎正憲, 加藤輝之. (2007). 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店,
- * 板野 稔久, (2010). 渦ロスビー波. 天気, 57(7), 8184.
- * 伊藤耕介, 仲田真理子, 宮里結衣, 宮本育利, 善村夏実. (2015). RSMC Tokyo 台風強度予報誤差データベースの構築と MPI を用いた補正. 2015 年度日本気象学会秋季大会.
- * 伊藤耕介. (2011). 台風強度の再現性向上に関するアジョイント手法を用いた基礎的研究. 博士論文.
- * 坪木和久・伊藤耕介. (2013). メソ構造 中澤哲夫・筆保弘徳 (編). 台風研究の最前線, 気象研究ノート 226-227 号. デジタル台風.